

DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.10.2.010

УДК 622.831.327, 622.831.31

© М.В. Шванкин, А.В. Бондарев, 2019

М.В. ШВАНКИН

канд. техн. наук,
заведующий лабораторией
горных ударов
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург
e-mail: vnimi-sgu@yandex.ru



А.В. БОНДАРЕВ

старший научный сотрудник
ООО «Институт горной геомеханики и
геофизики – Межотраслевой научный
центр ГЕОМЕХ», г. Санкт-Петербург
e-mail: alex_bondarev78@mail.ru



ОСОБЕННОСТИ ОТРАБОТКИ УДАРООПАСНЫХ ПЛАСТОВ В УСЛОВИЯХ ТРУДНООБРУШАЕМЫХ КРОВЕЛЬ

В статье рассмотрены способы управления тяжелыми кровлями и выделение энергии упругих деформаций массива в динамической форме (горный удар), что явилось главной задачей при выполнении НИР и ОПИ. Исследования, проведенные авторами, дали возможность установить горизонты расслоения кровли пласта, что привело к корректировке технологической схемы отработки. Описан характер разрушения тяжелых кровель в условиях Баренцбургского месторождения, который был принят в качестве базового.

Ключевые слова: ТРУДНООБРУШАЕМАЯ КРОВЛЯ, УДАРООПАСНЫЙ УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА, ТЕКТОНИЧЕСКАЯ НАРУШЕННОСТЬ, УПРАВЛЕНИЕ КРОВЛЕЙ, ОБРУШЕНИЕ, ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ.

До 100 угольных предприятий России отработывают пласты в условиях труднообрушаемых кровель, из них примерно половина – в условиях удароопасных пластов. Работы в таких условиях правомерно относятся к особо сложным условиям и требуют порой нетипичных подходов, но только через решение комплекса задач посредством наблюдений и анализа с целью оптимизации.

С одной стороны, предельно высокое горное давление в динамически нагруженной техногенным воздействием геологической среде кратно усложняет работу механизированных крепей лав, существенно меняет спо-

собы поддержания подготовительных горных выработок. С другой стороны, не предпринимаемая никаких действий по разупрочнению, мы сталкиваемся с еще более сложной проблемой – зависание основной кровли на больших площадях, с последующим обрушением и непредсказуемыми последствиями мгновенного выделения колоссальных объемов метана в действующие горные выработки.

На практике при прочных породах кровли часто происходит зависание ее на большой площади, что оказывает на краевые части угольного массива повышенное опорное давление. Разрабатываемый пласт и толща вме-

щающих пород являются единой системой накопления упругой энергии. Упругая энергия, накопленная в пласте, высвобождается при его разрушении. Вмещающие боковые породы не разрушаются, а накопленная в них упругая энергия проявляется в форме упругих колебаний и иногда может суммироваться с энергией разрушения пласта, усиливая эффект разрушения.

Способ управления кровлей существенно влияет на напряженное состояние краевой части угольного пласта. Можно выделить следующие способы снижения горного давления на удароопасных пластах. Во-первых, подработка или надработка пласта с созданием защитной зоны. Этот способ регламентируется «Инструкцией по разупрочнению...» [1]. Во-вторых, периодическое полное обрушение кровли на достаточную высоту, что снижает степень удароопасности. Использование в ежедневном планировании положений «Инструкции...» [1], которое в последние 2-3 года мы можем наблюдать повсеместно, например, на шахтах Воркутского месторождения, положительно по форме и сути сказывается на безопасности отработки. На пласте «Четвертый» Воркутского месторождения при зависании труднообрушаемой кровли необходимо применять принудительное обрушение (требование п. 8.1 Инструкции [1]). Это требование исходит из того, что в горно-геологических условиях залегания прочных слюев песчаника в породах кровли пласта резко усиливается степень напряженности участков, и формируются локальные тектонически напряженные зоны (ТНЗ). В-третьих, применение на пластах, подверженных горным ударам, технологической схемы, предусматривающей выемку ярусов через один столб.

Разработка удароопасного пласта по данному способу базируется на эффективном и безопасном ведении очистных работ с выемкой столбов в панели в две стадии и использованием сил горного давления для трещинообразования кровли и снижения пригрузок пласта в очистном забое. При временном оставлении столбов смежно с отработанными столбами их краевая зона под действием

сил горного давления претерпевает отжим и защищает конвейерные штреки от опасных проявлений горного давления. Такую же функцию выполняет зона пласта, принудительно разрыхленная взрывами, выше вентиляционных штреков при недостаточном отжиме угля силами горного давления. Разрыхленный уголь этих зон при проходке новых конвейерных штреков извлекается со снижением энергетических затрат, по сравнению с затратами на поддержание вентиляционных штреков для использования их как новых конвейерных. Попутно идет добыча угля в ходе проходческих работ. Новые конвейерные штреки ограждены разрыхленным углем от проявлений горного давления в очистных забоях при отработке временно оставленных столбов. Появление и прорастание трещин в породах кровли происходит под действием сил горного давления, которые нарастают при движении фронта очистных работ на выработанное пространство и уменьшении количества временно оставленных столбов. Дополнительно наводимые силами горного давления трещины улучшают обрушаемость пород при посадке кровли и позволяют снизить ее шаг за счет скольжения по бортам, а уменьшенный шаг посадки кровли снижает пригрузку пласта в очистном забое.

Данная технологическая схема имеет важное преимущество, что позволяет эффективно управлять состоянием массива горных пород и решать другие технические задачи, связанные с возможностью своевременной подготовки выемочных столбов к очистной выемке, более эффективной проходки и поддержания подготовительных выработок, улучшения организации угледобычи на участках. Данная технологическая схема рекомендуется для применения на пластах, склонных к горным ударам.

Использование на удароопасных пластах безцеликовых схем отработки предопределяет, в силу особенностей накопления упругой энергии в целиках, отсутствие нагруженных частей массива и, следовательно, выявляет характер подходов решения поставленных задач. Однако, как показали результаты мно-

голетних исследований в условиях удароопасного пласта Верхний Баренцбургского месторождения, оставление опорных целиков для удержания мощных кровель – мера не столько вынужденная, сколько исключительная, научно обоснованная, безопасная и эффективно используемая на протяжении 10-летия [2, 3]. Применение принудительного обрушения в условиях многолетних мерзлотных пород неприменимо, т. к. их зависание происходит на расстоянии от обрабатываемого пласта, которое не позволяет эффективно провести их расслоение.

В ходе наблюдений установлено, что при наличии слоев монолитных пород, залегающих непосредственно в кровле и почве пластов или на небольшом расстоянии от них, с пределом прочности ≥ 70 МПа и мощностью ≥ 8 м создаются наиболее опасные условия проявления горных ударов. Угольный пласт в подземных выработках в результате действия фактора времени, подвергаясь воздействию как динамических пригрузок (при добычных и проходческих работах на отдельных участках происходит быстрое изменение напряженного состояния), так и постоянно действующих длительных нагрузок, увеличивает склонность к динамическим проявлениям. Степень удароопасности возрастает с увеличением скорости нагружения, которое приводит к возрастанию модуля упругости угля с сохранением соотношения упругой деформации к полной. При нагрузках, составляющих 70–85 % от разрушающих, у удароопасных углей наблюдается незначительная затухающая деформируемость, приводящая к уплотнению и повышению склонности к хрупкому разрушению [4]. Упрочнение угля приводит к перемещению при постоянно действующих нагрузках зоны высоких напряжений из глубины к обнажению массива и при нагрузках 90–95 % от предельных напряжений происходит его хрупкое разрушение в короткий промежуток времени.

В этих условиях в процессе хрупкого разрушения угля образуются интенсивные отраженные волны, аккумулирующие значительную часть потенциальной энергии, выс-

вобождающейся при горном ударе. Структура налегающей и подстилающей толщи пород существенно влияет на характер проявления горных ударов, при этом каждый слой пород кровли и почвы имеет свое волновое сопротивление, в результате чего отраженная волна имеет различную интенсивность. В случае высокой интенсивности часть высвободившейся упругой энергии возвращается в пласт и переходит в кинетическую энергию с расходом на дополнительное дробление угля. И наиболее сильное воздействие будет при горных ударах ощущаться со стороны тех пород, у которых на границе раздела с угольным пластом коэффициент отражения упругой волны наибольший. «Ложная» кровля и почва при наличии выше или ниже залегающих мощных слоев прочных монолитных пород не оказывает существенного влияния на проявление горных ударов, и волна разгрузки, пройдя через нее, отразится от пород прочного монолитного слоя, аккумулируясь в очаге разрушения в виде дополнительного дробления угля.

Для решения вопроса управления горным давлением в условиях участвовавших случаев формирования зон повышенного горного давления и выделением энергии упругих деформаций массива в динамической форме авторами были осуществлены несколько серий наблюдений. Результаты этих наблюдений можно обобщить в следующие группы:

- изучение влияния трещиноватости на горные работы;
- изучение анизотропии тектонической трещиноватости;
- изучение характера деформирования боковых пород с помощью наблюдательных контурные реперных станций типа «кровля–почва» (измерения относительной конвергенции пород);
- наблюдения за расслоением мощного слоя песчаника, залегающего в кровле пласта, с применением прибора КДМ-2 (глубинные реперные станции контроля расслоения);
- визуальный контроль деформаций разгрузочных скважин по мере формирования выработанного пространства лавы;
- комплексная оценка уровня и распре-

деления напряжений по интервалам бурения стандартным методом по выходу буровой мелочи «Инструкция по горным ударам» [5] и с использованием глубинного динамического пробника ВНИМИ;

– изучение НДС массива посредством геофизических методов – ЕЭМИ [6] и микросейсмического [7].

Необходимость проведения НИР и ОПИ была обусловлена следующими причинами:

– оставляемые при отработке пласта Верхний целики угля являются мощными концентраторами напряжений, вследствие чего контроль за их состоянием у действующих выработок обязателен независимо от размеров целиков;

– недостаточно изучен характер нагружения опорных целиков;

– оставляемые для поддержания мощных кровель целики находятся в зоне активного перераспределения горного давления при меняющейся геометрии очистных работ.

Трещиноватость краевой части массива существенно влияет на характер его деформирования, разрушения и напряженное состояние. При развитой системе трещиноватости массива пластическое деформирование по естественным трещинам снижает вероятность формирования очагов горных ударов. Хрупкое разрушение краевой части трещиноватого массива возможно при углах падения трещин 0° и 90° , при условии их простирации по отношению к обнажению под углом $60-90^\circ$. При углах падения трещин $20-30^\circ$ и их простирации под углом $0-60^\circ$ по отношению к обнажению хрупкое разрушение массива невозможно. При этом зона максимальных напряжений находится на расстоянии не менее $3,5 \div 4$ мощностей от плоскости обнажения массива.

На прочность, характер деформирования и напряженное состояние влияют механические свойства отдельных слагающих массив пачек. Наиболее типичным удароопасным массивом является массив, сложенный одной или несколькими пачками угля и пород, различающимися по прочности и деформированию не более чем в 2 раза и сохраняющим

способность к упругому деформированию и хрупкому разрушению при всех сочетаниях отдельных угольных пачек.

При наличии пластичных слабых пачек происходит перемещение зоны высоких напряжений в глубину массива на величину не менее 4 мощностей, вследствие чего убывает разница между минимальными и максимальными напряжениями, снижается на 30–40 % степень напряженности и уменьшается вероятность хрупкого разрушения.

Краевая часть массива, сложенная пачками пород, различающимися по прочности в 10–20 раз, при мощности наиболее слабых и пластичных из них, составляющей $\geq 20\%$ от общей, является неудароопасной. В этих случаях соотношение упругой деформации к полной $< 70\%$.

Тектоническая нарушенность угольных месторождений не является определяющим признаком удароопасности, однако ее наличие вызывает повышение степени удароопасности пластов в связи с влиянием следующих факторов:

а) резким изменением прочностных и деформационных свойств угольного массива в непосредственной близости от тектонического нарушения; на участке протяженностью $5 \div 10$ м в обе стороны от нарушения уголь перемят и обладает пониженной прочностью, что создает при приближении к этой зоне забоев подготовительных или очистных выработок условия, аналогичные условиям доработки целика;

б) повышением степени напряженности краевой части участков массива, подвергнувшихся контактному метаморфизму;

в) наличием зон повышенных напряжений вблизи пликтивных геологических нарушений, которые являются потенциальными участками возможного проявления горных ударов;

г) наличием в непосредственной близости от тектонических нарушений зон с повышенными напряжениями и пониженной прочностью краевой части массива, способных к упругому деформированию и хрупкому разрушению.

Особенностью Баренцбургского месторождения является то, что в кровельной толще свиты залегают мощные слои прочных песчаников, определяющие повышенный уровень удароопасности по сравнению с другими месторождениями. Оценивая литологическую характеристику и прочностные свойства вмещающих пород Баренцбургской свиты, можно сделать вывод о неблагоприятных условиях отработки пласта Верхнего с точки зрения возможности проявления геодинамических процессов. Мощность толщи песчаников и переслаивающихся с ними алевролитов, которые по прочности мало отличаются от песчаников, обуславливает напряженное состояние в системе «кровля–пласт–почва».

Верхняя перекрывающая толща основной труднообрушающейся кровли пласта Верхнего представлена прочными песчаниками (мощность их только в пределах Баренцбургской свиты более 130 м, при глубине более 500 м). Происходит послойное крупноблочное обрушение основной кровли при достижении предельных пролётов, что является причиной геодинамических явлений в системе «кровля–пласт–почва».

По данным испытаний кровли пласта Верхний, представленного песчаниками, его прочность на одноосное сжатие в интервале от 0,0 до 30,0 м от кровли пласта в среднем составляет: для северного крыла – 160 МПа и южного – 156 МПа. Пределы изменения в основном от 84 до 231 МПа. Наименьшая прочность на одноосное сжатие ($\sigma_c = 49,7$ и $44,5$ МПа) отмечена на отдельных образцах в интервале 12,95–14,35 м и 25,25–27,25 м от кровли пласта, соответственно на северном и южном крыльях шахты. Испытания пород песчаника на растяжение, залегающих в этом же интервале от кровли пласта, осуществляли путем раскалывания образцов по образующей. Средняя прочность на растяжение составила 13 МПа, а пределы её изменения – от 9,6 до 18,7 МПа. Отношение прочности на сжатие к прочности на растяжение составляет $\sigma_c / \sigma_p = 10-15$. Модуль деформации преимущественно $1,7-2,3 \cdot 10^4$ МПа, а модуль упругости – $2,1-3,0 \cdot 10^4$ МПа.

На основании анализа материалов по строению, составу, механическим свойствам и температурным условиям угольных пластов и вмещающих пород месторождения можно выделить в нем постоянные и переменные факторы.

К постоянным можно отнести:

- проявление удароопасности пластов Нижний и Верхний с глубины горных работ 400 м;

- практически постоянная мощность толщи пород между пластами Нижний и Верхний, состоящей из чередующих слоев аргиллита, алевролита и песчаника преимущественно мощностью от 0,9 до 3,5–9,0 м;

- наличие по всему месторождению над пластом Верхний толщи прочных песчаников общей мощностью до 150 м, которая при подработке пластов может разделяться на отдельные монолитные слои мощностью от 10–17 до 40–60 м.

К переменным можно отнести:

- изменение мощности толщи мерзлых пород от 90–210 м на Собственном участке пласта Верхний до 400–470 м на Контрактном участке пласта Нижний;

- полное отсутствие слабопрочного прослоя из перемятого углистого аргиллита в непосредственной почве пласта Верхний и наличие его в непосредственной почве пласта Нижний при различном распространении на площадях Собственного и Контрактного участков.

Исследования, проведенные авторами в 2005 г., позволили установить горизонты расслоения кровли пласта. Были проведены зондирования двух скважин в кровле пласта Верхнего по 29 ЮКШ (скв. № 1 – ПК52+2 м и скв. № 2 – ПК24+5 м).

На скв. № 2 установлены глубинные репера на уровнях 28,1; 17,8; 12,4; 6,3; 2,4 м. В настоящее время ведутся ежедневные наблюдения за конвергенцией (почва–кровля) пласта Верхнего. Данные по расслоению кровли позволяют выделить уровни расслоения по скв. № 1 (ПК52+2 м) – 26,4; 12,3; 6,2; 3,0 м. По скв. № 2 (ПК24+5 м) на момент установки глубинных реперов – толща монолитная.

Учитывая натурные наблюдения, проведенные авторами, включающие изучение тектоники месторождения, и массовые замеры трещин, были прогнозированы благоприятные условия отработки 29 южной лавы вплоть до ЦЛУ, что впоследствии подтвердилось в результате отработки.

При отработке 30 южной лавы был учтен фактор расслоения кровли по указанным уровням (скв. № 1).

Выводы

В результате проведенных в 2000–2006 гг. исследований при отработке пласта Верхнего установлено, что при постепенном развитии динамических явлений максимальные нагрузки возникают в моменты последовательного разрушения мощных монолитных труднообрушаемых слоев песчаника при достижении ими первых предельных пролетов. В случае их интенсивного развития – нагрузкой, создаваемой весом всей остальной части налегающей толщи пород, вплоть до земной поверхности.

Причем, при значительных размерах отработки пласта мощные слои мерзлотной толщи начинают пригружать краевые части массива и целики.

Зависание пород за крепью 1,0–3 м. Вышележащая толща, состоящая из массивных песчаников общей мощностью 110–130 м, по опытным и прогнозным данным расслаивается и деформируется монолитными слоями мощностью 14–17, 40–42 и 60 м, которые относятся к классу тяжелых кровель. Обрушение этих слоев проходит последовательно, при достижении каждым слоем первого предельного пролета с последующим образованием арочной системы из блоков различной длины. Вследствие этого создается несколько арочных систем, которые, взаимодействуя между собой, формируют нагрузку на краевую часть пласта очистных забоев со стороны отработанного пространства и действующей лавы. Такой характер разрушений тяжелых кровель принят в качестве базового на основании исследований при отработке удароопасных пластов с тяжелыми кровлями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по выбору способа и параметров разупрочнения кровли на выемочных участках. Министерство угольной промышленности. СССР. Л.: ВНИМИ, 1991.
2. Шванкин М.В. Бондарев А.В. Методы удержания труднообрушаемой кровли на опорных целиках при наличии многолетнемерзлых пород в условиях Арктики // II Международная научно-практическая конференция, «Наука и инновационные разработки – Северу». Сборник материалов конференции в 2-х частях. Часть I. С. 100–103.
3. Пат. 2459079. Российская Федерация: МПК E21C41/16. Способ разработки участка пологого и наклонного удароопасного пласта / Шванкин М.В., Яковлев Д.В., Минин Ю.Я., Бондарев А.В., Кохальников А.В. № 2011109682/03, заявл.16.03.2011; опубл. 20.08.2012.
4. Яковлев Д.В., Шванкин М.В., Бондарев А.В. и др. Опыт разработки удароопасных пластов Баренцбургского месторождения // Сборник научных трудов ВНИМИ. СПб, 2012. С. 138–154.
5. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений (Утв. приказом Ростехнадзора №339 от 15.08.2016 г.) URL:// <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71431466/> (дата обращения 14.05.2019).
6. Пат. 2535329. Российская Федерация: МПК E21C39/00. Способ определения удароопасности массива горных пород по электромагнитной эмиссии и устройство для его осуществления / Яковлев Д.В., Мулёв С.Н., Цирель С.В., Максимов А.С., Мазья М.Д., Бондарев А.В., Баданин А.И., заявл.16.10.2013; опубл. 10.12.2014.
7. Яковлев Д.В., Мулёв С.Н., Система сейсмического мониторинга GITS // Сб. науч. тр. ВНИМИ. СПб.: ВНИМИ, 2012. С. 18–25.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.10.2.010

UDC 622.831.327, 622.831.31

© M.V. Shvankin, A.V. Bondarev, 2019

M.V. SHVANKIN

Candidate of Engineering Sciences,
Head of Laboratory
rock bumps
St.-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg
e-mail: vnimi-sgu@yandex.ru

A.V. BONDAREV

Senior Research Assistant
LLC «Institute of Mining Geomechanics
and geophysics–scientific center GEOMEH», Saint-Petersburg
e-mail: alex_bondarev78@mail.ru

**PECULIARITIES OF SEAM LIABLES TO ROCK-BUMPS
IN CONDITIONS HARD-CAVING ROOF**

In article are considered the ways of management of heavy roofs existence of hard-caving roof and allocation of energy of elastic deformations of the mass in a dynamic form (mountain blow) that was the main task when performing research and OPI. Researches conducted by authors gave the chance to establish the horizons of stratification of a roof of layer that led to updating of the technological scheme of mining. The nature of destruction of heavy roofs in the conditions of the Barentsburgsky field which was accepted as basic is described.

Keywords: POORLY CAVING ROOF, SEAM LIABLE TO ROCK-BUMPS, FLOW DIAGRAM, TECTONIC DISTURBANCE, STRATA CONTROL, CAVING, GEODYNAMIC PHENOMENA.

REFERENCES

1. Instructions for choosing the method and parameters of roof softening on excavation sites. Ministry of Coal Industry of the USSR. L.: VNIMI, 1991. (In Russ.).
2. Shvankin M.V., Bondarev A.V. Methods of deduction of the hardly brought down roof on supporting pillars with permafrost breeds in the conditions of Arctic // II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, «Nauka i innovatsionnyye razrabotki – Severu». Sbornik materialov konferentsii v 2-kh chastyakh [II International Scientific And Practical Conference, «Science and innovative developments – to the North». Collection of materials of a conference in 2 parts]. Part I. P. 100-103. (In Russ.).
3. Pat. 2459079. Russian Federation: IPC E21C41/16. Method for developing area of flat and slope seam liable to rock-bumps / Shvankin M.V., Yakovlev D.V., Minin Yu.Ya., Bondarev A.V., Kokhalnikov A.V. No. 2011109682/03, Dec 16.03.2011; publ. 08/20/2012. (In Russ.).
4. Yakovlev D.V., Shvankin M.V., Bondarev A.V. et al. Experience of development of shock-hazardous layers of the Barentsburg field // Sbornik nauchnykh trudov VNIMI [Collection of scientific works of the All-Union Institute of Scientific Research], St. Petersburg, 2012. P. 138–154. (In Russ.).
5. Instructions for prediction of dynamic phenomena and monitoring of the rock mass when mining coal deposits (Approved by order of Rostekhnadzor No. 339 dated August 15, 2016) // URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71431466/> (date of appeal is 05/14/2019) (In Russ.).

6. Pat. 2535329. Russian Federation: IPC E21C39/00. Method for determining the shock hazard of an array of rocks by electromagnetic emission and a device for its implementation / Yakovlev D.V., Mulyov S.N., Tsirel S.V., Maksimov A.S., Mazya D.D., Bondarev A.V., Badanin A.I., filed.16.10.2013; publ. 12.10.2014.

7. Mulyov S.N., Yakovlev V.A., etc System of seismic monitoring GITS // Sbornik nauchnykh trudov VNIMI [Collection of scientific works VNIMI]. SPb.: VNIMI, 2012. P. 18–25. (In Russ.).